УДК 532.58
DOI 10.17223/19988621/70/10

О.Н. Филимонова, А.А. Воробьев, А.С. Викулин

ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В АДСОРБЕРАХ БЛОКОВ КОМПЛЕКСНОЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

На основе погранслойного приближения феноменологического уравнения Дарси – Бринкмана – Форчхеймера движения компримированного атмосферного воздуха через вертикальный цилиндрический адсорбер с неподвижным зернистым слоем адсорбента предложена математическая модель оценки неоднородности гидродинамического поля в радиальном и аксиальном направлениях. Получены аналитические решения модельных уравнений. Показана эффективность такого подхода для оценки гидродинамической обстановки в серийно выпускаемом адсорбционном блоке комплексной очистки воздухоразделительных установок, работающих по термодинамическому циклу высокого давления.

Ключевые слова: *зернистый слой адсорбента, неоднородность поля скоростей, порозность, проницаемость, атмосферный воздух.*

Разделение атмосферного воздуха в воздухоразделительных установках (ВРУ) по термодинамическому циклу высокого давления требует предварительной его очистки от влаги, диоксида углерода и углеводородов в адсорберах с неподвижным слоем гранулированного адсорбента [1, 2]. Для минимизации проскоковых концентраций примесей необходимы оценки геометрических характеристик адсорберов и идентификация рациональных диапазонов их эксплуатационных характеристик [3]. Это позволит нивелировать взрывопожароопасность и увеличить длительность межотогревного периода [4].

Как показывает анализ, проведенный в [5], допущение о гидродинамическом режиме идеального вытеснения воздушного потока через пористую матрицу неподвижного слоя гранулированного адсорбента в адсорбере может привести к искажению прогнозируемых локальных сепарационных характеристик. Правомочность такого упрощения должна решаться в каждом конкретном случае на основе классической смешенной гидродинамики неподвижных зернистых сред [6].

В последнее время наметилась тенденция расширения сегмента применения мобильных криогенных ВРУ двойного назначения АКДС–70М2, ТКДС–100В и других [7], а также разработки новых образцов [8, 9]. В связи с этим целью данного исследования является разработка инструментария для оценки гидродинамической обстановки существующих и вновь проектируемых адсорберов блоков комплексной очистки (БКО).

Математическая модель

Рассуждения проведены на примере серийно выпускаемого адсорбционного БКО типа ЦБ-400/200, имеющего следующие характеристики [10]: объем воздуха, перерабатываемого за один час при нормальных условиях, 2400 м^3/ч; рабочее давление 20 МПа; адсорбент – гранулированный цеолит NaX с характерным диаметром $d_p = 5$мм; диаметр и высота цилиндрического зернистого слоя $2r_0 = 377$ мм и $h = 1900$ мм соответственно.

После компримирования атмосферный воздух перед подачей в БКО охлаждается приблизительно до 15 °С и при таких термодинамических условиях его плотность и динамическая вязкость будут $\rho_g = 242.3$ кг/м^3 и $\mu_g = 2.38\cdot10^{-5}$ Па·с [11]), то число Рейнольдса в пористой матрице гранулированного адсорбента, если принять, что порозность зернистого слоя $\varepsilon = 0.4$, коэффициент формы для цилиндрических частиц $k_V \approx 0.69$, максимальная скорость фильтрации $v_0 = 0.08$ м/с, составит [12]

$$\mathrm{Re} = \frac{2k_V}{3(1-\varepsilon)}\frac{v_0 d_p \rho_g}{\mu_g} = 1447.$$

Отсюда следует наличие турбулентного режима движения газовой смеси в адсорбере ($\mathrm{Re} > 50$), что обосновывает применение феноменологической модели гидродинамики в пористой среде [13]:

$$\nabla \cdot \bar{v} = 0; \tag{1}$$

$$\frac{\rho_g}{\varepsilon}\left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial \tau} + (\bar{v}\cdot\nabla)\bar{v}\right] = -\nabla p + \frac{\mu_g}{\varepsilon}\nabla^2\bar{v} - \left(\mu_g \frac{\bar{v}}{K} + \rho_g \frac{f\bar{v}|\bar{v}|}{\sqrt{K}}\right), \tag{2}$$

где τ – время; $\bar{v}$ – вектор скорости газовой среды в зернистом слое; p – давление; K – проницаемость пористой матрицы; f – фактор Форчхеймера. В приближении пограничного слоя [14] система (1), (2) представлена в компонентном виде в цилиндрической осесимметричной системе координат orz (начало координат расположено в центре входного сечения потока; r, z – радиальная и аксиальная координаты):

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r v_r) = 0;$$

$$\frac{\rho_g}{\varepsilon}\frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu_g}{\varepsilon}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)\right] - \frac{\mu_g}{K}v_z - \frac{\rho_g f}{\sqrt{K}}v_z^2, \tag{3}$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0,$$

где v_z, v_r – аксиальная и радиальная скорости несущей среды. Представленная система дополняется условием на входе

$$v_z(r,0) = v_0 = \mathrm{const}, \tag{4}$$

а также граничными условиями «прилипания»

$$v_z(r_0,z) = 0 \tag{5}$$

и непротекания через ось симметрии

$$\frac{\partial v_z(0,z)}{\partial r} = 0 \tag{6}$$

(полагается, что расход среды в любом поперечном сечении трубы постоянен). Система (3) – (6) в безразмерном виде записана следующим образом:

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = -\varepsilon\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{\mathrm{Re}}\left[\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{\partial V}{\partial R}\right)\right] - \left(\frac{\varepsilon}{\mathrm{DaRe}}V + \frac{f\varepsilon}{\sqrt{\mathrm{Da}}}V^2\right); \tag{7}$$

$$V(R,0) = 1; \tag{8}$$

$$V(1,Z)=\frac{\partial V(0,Z)}{\partial R}=0, \qquad (9)$$

где $Z=z/r_0$; $R=r/r_0$; $V=v_z/v_0$; $P=p/(\rho_g v_0^2)$; $\mathrm{Re}=v_0 r_0\rho_g/\mu_g$ – число Рейнольдса; $\mathrm{Da}=K/r_0^2$ – число Дарси.

Радиальная неоднородность

Вдали от входа в пористую трубу ($Z\to\infty$; $\partial P/\partial Z=\mathrm{const}$) (7) примет вид

$$\frac{1}{R}\frac{d}{dR}\left(R\frac{dV}{dR}\right)-\frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}V-f\frac{\varepsilon\,\mathrm{Re}}{\sqrt{\mathrm{Da}}}V^2+C\,\mathrm{Re}=0, \qquad (10)$$

где $C=-\varepsilon\dfrac{\partial P}{\partial Z}$. Выбор линейно-независимых функций, принадлежащих к полной последовательности [15], для аппроксимирующей функции в методе коллокаций [16] осуществлен из предположения, что в первом приближении инерционными эффектами можно пренебречь [17], то есть положить $f\equiv 0$. Тогда, из (10) следует уравнение Дарси – Бринкмана

$$\frac{1}{R}\frac{d}{dR}\left(R\frac{dV}{dR}\right)-\frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}V+C\,\mathrm{Re}=0, \qquad (11)$$

решение которого при граничных условиях (9) получено с помощью конечного интегрального преобразования Ханкеля [18]:

$$H_R[V(R)]=V_H(p)=\int_0^1 RJ_0(pR)V(R)dR,$$

тогда изображение (11) с учетом (9) будет

$$V_H(p)=C\,\mathrm{Re}\frac{J_1(p)}{p(p^2+\varepsilon\mathrm{Da}^{-1})},$$

а возвращаясь к оригиналу, получим

$$V(R)=H_R^{-1}[V_H(p)]=2C\,\mathrm{Re}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{J_0(p_nR)}{p_nJ_1(p_n)(p_n^2+\varepsilon\mathrm{Da}^{-1})}, \qquad (12)$$

где p_n – корни уравнения $J_0(p)=0$. Если в (12) ограничиться первыми двумя членами ряда, то структура приближенного решения (10) может быть представлена в виде

$$\tilde{V}(R)=2C\,\mathrm{Re}\,\gamma\sum_{k=1}^{2}\frac{J_0(p_kR)}{p_kJ_1(p_k)(p_k^2+\varepsilon\mathrm{Da}^{-1})}\alpha_k, \qquad (13)$$

где γ – нормировочный множитель; α_k– неизвестные параметры, подлежащие определению.

Подстановка (13) в (10) приводит к выражению

$$\sum_{k=1}^{2}\frac{p_kJ_0''(p_kR)+J_0'(p_kR)R^{-1}-\varepsilon\left(p_k\mathrm{Da}\right)^{-1}J_0(p_kR)}{J_1(p_k)(p_k^2+\varepsilon\mathrm{Da}^{-1})}\alpha_k-$$

$$-\frac{2fC\left(\varepsilon\,\mathrm{Re}\right)^2}{\sqrt{\mathrm{Da}}}\left[\sum_{k=1}^{2}\frac{J_0(p_kR)}{p_kJ_1(p_k)(p_k^2+\varepsilon\mathrm{Da}^{-1})}\alpha_k\right]^2+\frac{1}{2\varepsilon}=0. \qquad (14)$$

Согласно формуле Козени – Кармана [13],

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)} = 1.8 \cdot 10^{-8}\ \text{м}^2,$$

тогда $\mathrm{Da} = K/r_0^2 = 5.06 \cdot 10^{-7}$, и поэтому из (14) в силу того, что $\mathrm{Da} \to \infty$, следует

$$\sum_{k=1}^{2} \frac{J_0(p_k R)}{p_k J_1(p_k)(p_k^2 + \varepsilon \mathrm{Da}^{-1})} \alpha_k = -\frac{1}{2 f C \varepsilon \mathrm{Re}^2 \sqrt{\mathrm{Da}}}. \quad (15)$$

Коллокации в точках $R = 0$ и $R = R^*$ $(0 < R^* \le 1)$ позволили из (15) найти

$$\alpha_1 = (2 f C \varepsilon \mathrm{Re}^2 \sqrt{\mathrm{Da}})^{-1} \frac{J_0(p_2 R^*) - 1}{J_0(p_2 R^*) - J_0(p_1 R^*)} p_1 J_1(p_1)(p_1^2 + \varepsilon Da^{-1}),$$

$$\alpha_2 = (2 f C \varepsilon \mathrm{Re}^2 \sqrt{\mathrm{Da}})^{-1} \frac{1 - J_0(p_1 R^*)}{J_0(p_2 R^*) - J_0(p_1 R^*)} p_2 J_1(p_2)(p_2^2 + \varepsilon Da^{-1}),$$

и соответственно можно записать профиль скорости (13) в окончательном виде

$$\tilde{V}(R) = \frac{[J_0(p_2 R^*) - 1] J_0(p_1 R) + [1 - J_0(p_1 R^*)] J_0(p_2 R^*)}{J_0(p_2 R^*) - J_0(p_1 R^*)}, \quad (16)$$

причем $\gamma = \varepsilon f \mathrm{Re} \sqrt{\mathrm{Da}}$, $f = 0.0117 d_p (1 - \varepsilon) = 9.75 \cdot 10^{-5}$м [13].

Расчеты с учетом балансового соотношения

$$2\int_0^1 R \tilde{V}(R) dR = 1,$$

и сравнительный анализ (рис. 1) с экспериментальными (для которых $2r_0/d_p >> 10$) показали, что гидродинамический режим в адсорбере близок к режиму идеального вытеснения за исключением узкой приграничной области, примыкающей к внутренней стенке корпуса.

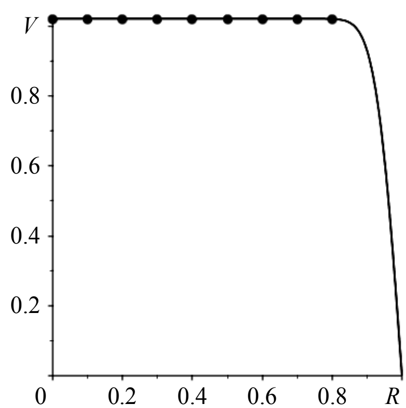

Рис. 1. Профиль безразмерной скорости установившегося режима течения в зернистом слое адсорбента: ● – расчет по формуле (16); ▬ – данные из [19]

Fig. 1. Dimensionless velocity profile for a steady-state flow in a granular adsorbent layer: ● – calculation by formula (16); ▬ – data from [19]

Если в расчетах (формула (14)) положить $f \equiv 0$, то профиль скорости практически не изменяется, что дает возможность использовать для анализа аксиальной неоднородности приближение Дарси – Бринкмана [20].

Аксиальная неоднородность

Осреднение уравнения (7) по поперечному сечению при $f \equiv 0$ позволило получить соотношение для аксиального безразмерного градиента давления

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = \frac{2}{\varepsilon \cdot \mathrm{Re}} \frac{\partial V(Z,1)}{\partial R} + \frac{1}{\mathrm{ReDa}},$$

которое использовано при нахождении изображения (7) по одностороннему интегральному преобразованию Лапласа относительно переменной Z

$$\frac{d^2 V_L(s,R)}{dR^2} + \frac{1}{R}\frac{dV_L(s,R)}{dR} - \left(\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}\right) V_L(s,R) = 2\frac{\partial V_L(s,1)}{\partial R} - \left(\mathrm{Re} + \frac{\varepsilon}{s \cdot \mathrm{Da}}\right), \quad (17)$$

где $V_L(s,R)$ – изображение $V(Z,R)$. Общее решение (17)

$$V_L(s,R) = C_1 I_0\left(R\sqrt{\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right) + C_2 K_0\left(\sqrt{\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right) +$$
$$+\left[-2\frac{\partial V_L(s,1)}{\partial R} + \left(\mathrm{Re} + \frac{\varepsilon}{s\cdot \mathrm{Da}}\right)\right] \Big/ \left(\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}\right),$$

где I_0, K_0 – модифицированные функции Бесселя первого и второго родов, причем константы интегрирования C_1 и C_2 найдены с помощью граничных условий (9)

$$C_1 = \left[2\frac{\partial V_L(s,1)}{\partial R} - \left(\mathrm{Re} + \frac{\varepsilon}{s\cdot \mathrm{Da}}\right)\right] \Big/ \left[\left(\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}\right) I_0\left(\sqrt{\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right)\right], \quad C_2 = 0;$$

в итоге

$$V_L(s,Z) = \frac{\left[I_0\left(\sqrt{\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right) - I_0\left(R\sqrt{\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right)\right]}{\left\{s\left[I_0\left(\sqrt{\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right) - 2I_1\left(\sqrt{\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right) \Big/ \sqrt{\mathrm{Re}\cdot s + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right]\right\}}. \quad (18)$$

Вследствие того, что числитель и знаменатель (18) являются бесконечными полиномами относительно целых степеней s, причем порядок полинома знаменателя больше, чем порядок полинома числителя, поэтому оригинал изображения (18) получен с использованием второй теоремы разложения:

$$V(s,Z) = \frac{I_0\left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right) - I_0\left(R\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right)}{I_0\left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right) - 2I_1\left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}\right) \Big/ \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}}} -$$
$$-\sum_{n=1}^{\infty} \frac{[J_0(\mu_n) - J_0(\mu_n R)]\exp\left[-\left(\mu_n^2 + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}\right)\frac{Z}{\mathrm{Re}}\right]}{\left(\mu_n^2 + \frac{\varepsilon}{\mathrm{Da}}\right)\left[\frac{1}{2\mu_n} J_1(\mu_n) - \frac{1}{\mu_n^2} J_2(\mu_n)\right]}, \quad (19)$$

где μ_n – корни уравнения $J_0(\mu) = 2J_1(\mu)/\mu$.

Структура поля скоростей в области, примыкающей к входному сечению, определяет число Дарси (рис. 2): чем больше число Дарси, тем влияние гидродинамического начального участка более значимо.

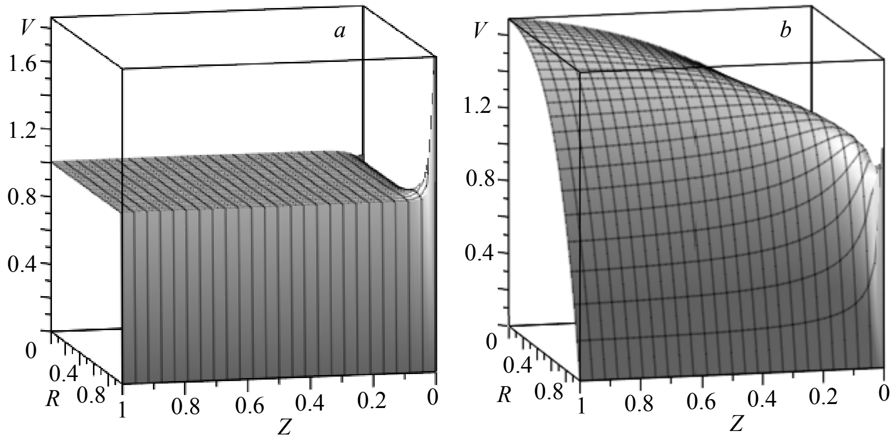

Рис. 2. Поле относительной скорости во входной области цилиндрического пористого канала при Re = 1447 и различных числах Дарси: *a* – $5.06{\cdot}10^{-7}$; *b* – $5.06{\cdot}10^{-3}$
Fig. 2. A relative velocity field at the inlet of a cylindrical porous channel at Re = 1447 and various Darcy numbers: (*a*) $5.06{\cdot}10^{-7}$ and (*b*) $5.06{\cdot}10^{-3}$

Сравнение осевой скорости $V(Z,0)$ с экспериментальными результатами (рис. 3) подтверждает адекватность изложенного подхода.

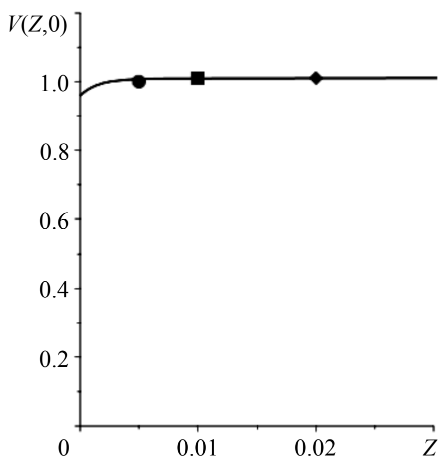

Рис. 3. Экспериментальные результаты измерения длины гидродинамического начального участка (● – [21]; ■ – [22]; ♦ – [23]) и расчетный профиль осевой скорости (сплошная кривая)
Fig. 3. Experimental results of measuring the length of a hydrodynamic initial section (● – [21]; ■ – [22]; ♦ – [23]) and the calculated axial velocity profile (the solid curve)

Расхождение опытных данных о длине гидродинамического начального участка в неподвижном зернистом слое адсорбента объясняется недостаточным объемом исследований влияния $2r_0/d_p$ и v_0 на ее величину [24].

Заключение

Классическое уравнение Дарси – Бринкмана – Форчхеймера позволило построить математическую модель, которая может являться инструментом для оценки неоднородности поля скоростей в радиальном и аксиальном направлениях в цилиндрическом изотропном пористом канале, имитирующем адсорбер блока комплексной очистки воздухоразделительных установок. Эффективность такого подхода продемонстрирована на примере идентификации поля скоростей атмосферного воздуха в блоке комплексной очистки типа ЦБ-400/200.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Singla P.*, *Chowdhury K.* Comparisons of thermodynamic and economic performances of cryogenic air separation plants designed for external and internal compression of oxygen // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 160. Article 114025. DOI: 10.17632/r3875vhrjs.2.
2. *Brigagão G.V.*, *de Medeiros J.L.*, *Araújo O.Q.* A novel cryogenic vapor-recompression air separation unit integrated to oxyfuel combined-cycle gas-to-wire plant with carbon dioxide enhanced oil recovery // Energy Conversion and Management. 2019. V. 189. P. 202–214. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.03.088.
3. *Suzuki M.* Adsorption Engineering. Tokya: Kodansha Ltg., 1990. 278 p.
4. *Nolan D.P.* Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities. NY: William Andrew, 2014. 487 p.
5. *Toth J.* Adsorption: Theory, Modeling, and Analysis. NY: Marcel Dekker, Inc., 2001. 880 p.
6. *Nield D.A.*, *Bejan A.* Convection in Porous Media. NY: Springer, 2006. 654 p.
7. *Корнилов И.В.*, *Петров Ю.Е.*, *Сагадатов И.И.*, *Тагиров И.Х.*, *Япрынцев П.О.* Автотехническое и электрогазовое обеспечение авиационных частей. Уфа: УГАТУ, 2016. 130 с.
8. *Бумагин Г.И.*, *Рогальский Е.И.*, *Попов Л.В.* Автомобильная многоцелевая воздухоразделительная установка АКДС-100 нового поколения // Технические газы. 2008. № 1. С. 48–51.
9. *Тарасова Е.Ю.* Новые решения, высокая эффективность: опыт создания ВРУ $К_ДА_ДА_Р$-18/14 // Технические газы. 2011. № 6. С. 2–8.
10. *Архаров А.М.* и др. Криогенные системы. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем. М.: Машиностроение, 1999. 720 с.
11. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
12. *Lai T.*, *Liu X.*, *Xue S.*, *Xu J.*, *He M.*, *Zhang Y.* Extension of Ergun equation for the calculation of the flow resistance in porous media with higher porosity andopen-celled structure // *Applied Thermal Engineering*. 2020. V. 173. Article 115262. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115262.
13. *Alazmi B.*, *Vafai K.* Analysis of variable porosity, thermal dispersion, and local thermal nonequilibrium on free surface flows through porous media // Journal of Heat Transfer. 2004. V. 126(3). P. 389–399. DOI: 10.1115/1.1723470.
14. *Ряжских В.И.*, *Коновалов Д.А.*, *Слюсарев М.И.*, *Дроздов И.Г.* Анализ математической модели теплосъема с плоской поверхностью ламинарно движущимся хладагентом через сопряженную пористую среду // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2016. Т. 2. № 3. С. 68–81.
15. *Bühber T.*, *Salamon D.A.* Functional analysis. NY: American Mathematical Society, 2018. 482 p.
16. *Коннор Дж.*, *Бреббиа К.* Метод конечных элементов в механике жидкости. Л.: Судостроение, 1979. 264 с.

17. *Izadpanah M.R.*, *Müller-Steinhagen H.*, *Jamialahmadi M.* Experimental and theoretical studies of convective heat transfer in a cylindrical porous medium // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1998. V. 19. P. 629-635. DOI: 10.1016/S0142-727X(98)10035-8 22.
18. *Снеддон И.Н.* Преобразование Фурье. М.: ИЛ, 1955. 667 с.
19. *Дидушинский Я.* Основы проектирования каталитических реакторов. М.: Химия, 1972. 376 с.
20. *Hsu C.T.*, *Cheng P.* Thermal dispersion in porous medium // Int. J. Heat Mass Transfer. 1990. V. 33. Iss. 8. P. 1587–1597. DOI: 10.1016/0017-9310(90)90015-M.
21. *Ziolkowska L.*, *Badowska I.*, *Flejter B.*, *Mieskowski Z.* Wplyw wysokosci warstwy zloza na profil predkosci w rurze z wypelnieniem ziarnistym // Inzynieria chemiczna i procesowa. 1980. V. 1. No. 2. P. 393–405.
22. *Newell R.*, *Standish N.* Velocity distribution in rectangular pached beds and non-ferrous blast furnaces // Metallurgical Transactions. 1973. V. 4. No. 8. P. 1851–1857.
23. *Schwartz C.E.*, *Smith J.M.* Flow distribution in packed beds // Ind. and Eng. Chem. 1953. V. 45. No. 6. P. 1209–1218.
24. *Пушнов А.*, *Балтренас П.*, *Каган А.*, *Загорскис А.* Аэродинамика воздухоочистных устройств с зернистым слоем. Вильнюс: Техника, 2010. 348 с.

Статья поступила 30.06.2020

Filimonova O.N., Vorobyov A.A., Vikulin A.S. (2021) ESTIMATION OF HETEROGENEITY OF THE ATMOSPHERIC AIR VELOCITY FIELD IN ADSORBERS OF FRONT-END PURIFICATION UNITS FOR AIR SEPARATION PLANTS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 70. pp. 117–126

DOI 10.17223/19988621/70/10

Keywords: granular adsorbent layer, velocity field heterogeneity, porosity, permeability, atmospheric air.

Assuming unidirectional motion of compressed atmospheric air through a vertical cylindrical adsorbent with a fixed granular layer of the front-end purification unit adsorbent, the mathematical model for estimating the heterogeneity of a hydrodynamic velocity field in the radial and axial directions in a turbulent regime is proposed. The model is based on the boundary layer approximation of the Darcy – Brinkman – Forchheimer phenomenological equation. The steady-state flow at low permeability of the granular layer is identified using the collocation method, and the approximate analytical solution is obtained which justifies the applicability of an ideal displacement mode when describing the carrier medium motion. Numerical integration of a boundary value problem of the model equation using the finite-difference method with Richardson extrapolation confirms the conclusion validity. The structure of an accelerated turbulent flow having constant flow velocity in the input section shows that for small Forchheimer coefficients, the Darcy – Brinkman equation is used to obtain the analytical ratio for calculating the length of the initial hydrodynamic section. The proposed mathematical model for estimating the heterogeneity of the velocity field in adsorbers with a stationary dispersed layer is applicable for a laminar flow regime. Testing of this approach by assessing velocity field uniformity for a mass-produced front-end purification unit of air separation plants has shown its efficiency.

Olga N. FILIMONOVA (Doctor of Technical Sciences, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation). E-mail: olga270757@rambler.ru

Aleksandr A. VOROBYOV (Candidate of Technical Sciences, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation). E-mail: aleksandr.vorobev.2012@bk.ru

Andrey S. VIKULIN (Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation). E-mail: mmiler5472@yandex.ru

REFERENCES

1. Singla P., Chowdhury K. (2019) Comparisons of thermodynamic and economic performances of cryogenic air separation plants designed for external and internal compression of oxygen. *Applied Thermal Engineering*. 160. Article 114025. DOI: 10.17632/r3875vhrjs.2.
2. Brigagão G.V., de Medeiros J.L., Araújo O.Q. (2019) A novel cryogenic vapor-recompression air separation unit integrated to oxyfuel combined-cycle gas-to-wire plant with carbon dioxide enhanced oil recovery. *Energy Conversion and Management*. 189. pp. 202–214. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.03.088.
3. Suzuki M. (1990) *Adsorption Engineering*. Tokyo: Kodansha Ltg.
4. Nolan D.P. (2014) *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil*, *Gas*, *Chemical and Related Facilities*. New York: William Andrew.
5. Toth J. (2001) *Adsorption*: *Theory*, *Modeling*, *and Analysis*. New York: Marcel Dekker.
6. Nield D.A., Bejan A. (2006) *Convection in Porous Media*. New York: Springer.
7. Kornilov I.V., Petrov Yu.E., Sagadatov I.I., Tagirov I.Kh., Yapryntsev P.O. (2016) *Avtotekhnicheskoe i elektrogazovoe obespechenie aviatsionnykh chastey* [Automotive and gas supply for aviation units]. Ufa: Ufa State Aviation Technical University.
8. Bumagin G.I., Rogal'sky E.I., Popov L.V. (2008) Avtomobil'naya mnogotselevaya vozdukhorazdelitel'naya ustanovka AKDS-100 novogo pokoleniya [Automobile new-generation multi-purpose air separation unit AKDS-100]. *Tekhnicheskie gazy – Technical Gases*. 1. pp. 48–51. DOI: 10.18198 / j.ind.gases.2008.0350.
9. Tarasova E.Yu. (2011) Novye resheniya, vysokaya effektivnost': opyt sozdaniya VRU $K_DA_DA_P$-18/14 [New solutions, high efficiency: the experience of creating the ASU $K_DA_DA_P$-18/14]. *Tekhnicheskie gazy – Technical Gases*. 6. pp. 2–8. DOI: 10.18198/ j.ind.gases.2011.0580.
10. Arkharov A.M. et al. (1999) *Kriogennye sistemy. Tom 2. Osnovy proektirovaniya apparatov*, *ustanovok i sistem* [Cryogenic systems. Volume 2. Fundamentals of the design of apparatuses, plants, and systems]. Moscow: Mashinostroenie.
11. Vargaftik N.B. (1972) *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow: Nauka.
12. Lai T., Liu X., Xue S., Xu J., He M., Zhang Y. (2020) Extension of Ergun equation for the calculation of the flow resistance in porous media with higher porosity and open-celled structure. *Applied Thermal Engineering*. 173. Article 115262. DOI: 10.1016/ j.applthermaleng.2020.115262.
13. Alazmi B., Vafai K. (2004) Analysis of variable porosity, thermal dispersion, and local thermal nonequilibrium on free surface flows through porous media. *Journal of Heat Transfer*. 126(3). pp. 389–399. DOI: 10.1115/1.1723470.
14. Ryazhskikh V.I., Konovalov D.A., Slyusarev M.I., Drozdov I.G. (2016) Analiz matematicheskoy modeli teplos"yoma s ploskoy poverkhnost'yu laminarno dvizhushchimsya khladagentom cherez sopryazhennuyu poristuyu sredu [Analysis of mathematical model of heat removal from the flat surface by the laminar moving refrigerant through conjugation porous medium]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya*: *Matematicheskoe modelirovanie i programmirovanie – South Ural State University Journal of Mathematical Modeling and Programming*. 2(3). pp. 68–81. DOI: 10.14529/mmp160306.
15. Bühber T., Salamon D.A. (2018) *Functional Analysis*. New York: American Mathematical Society.
16. Connor J.J., Brebbia C.A. (1976) *Finite Element Techniques for Fluid Flow*. London; Boston: Newnes–Butterworths.
17. Izadpanah M.R., Müller-Steinhagen H., Jamialahmadi M. (1998) Experimental and theoretical studies of convective heat transfer in a cylindrical porous medium. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 19. pp. 629–635. DOI: 10.1016/S0142-727X(98)10035-8 22.

18. Sneddon I.N. (1951) *Fourier Transforms*. New York: McGraw-Hill.
19. Didushinskiy Ya. (1972) *Osnovy proektirovaniya kataliticheskikh reaktorov* [Fundamentals of the design of catalytic reactors]. Moscow: Khimiya.
20. Hsu C.T., Cheng P. (1990) Thermal dispersion in porous medium. *International Journal of Heat Mass Transfer*. 33(8). pp. 1587–1597. DOI: 10.1016/0017-9310(90)90015-M.
21. Ziolkowska L., Badowska I., Flejter B., Mieskowski Z. (1980) Wplyw wysokosci warstwy zloza na profil predkosci w rurze z wypelnieniem ziarnistym. *Inzynieria Chemiczna i Procesowa*. 1(2). pp. 393–405.
22. Newell R., Standish N. (1973) Velocity distribution in rectangular packed beds and non-ferrous blast furnaces. *Metallurgical Transactions*. 4(8). pp. 1851–1857.
23. Schwartz C.E., Smith J.M. (1953) Flow distribution in packed beds. *Industrial and Engineering Chemistry*. 45(6). pp. 1209–1218.
24. Pushnov A., Baltrenas P., Kagan A., Zagorskis A. (2010) *Aerodinamika vozdukhoochistnykh ustroystv s zernistym sloem* [Aerodynamics of air-cleaning devices with a granular layer]. Vilnius: Tekhnika.

Received: June 30, 2020